

Optimización Estructural y Topológica de Armaduras mediante Algoritmos Genéticos

Resumen: El proyecto “Modelado y diseño de cubiertas de naves industriales mediante técnicas de form-finding y algoritmos de inteligencia computacional” cursa su tercer y último año, obteniendo avances importantes en el diseño estructural.

En el trabajo expuesto se realiza una breve descripción del algoritmo genético desarrollado, seguido de su ejecución para la optimización en peso de una celosía plana de cordones paralelos de una nave industrial de la localidad de Rafaela.

Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios, reduciendo de manera considerable el peso de la cercha y fortaleciendo conceptos básicos sobre el diseño de estructuras planas.

La articulación entre diseño paramétrico, análisis por elementos finitos y algoritmos genéticos, concibe una herramienta muy potente y flexible que hace posible obtener resultados más eficientes que los obtenidos por un ingeniero a través de su experiencia e intuición.

Palabras Claves: Optimización; Estructuras; Algoritmos genéticos, Formfinding.

Abstract: The project “Modeling and design of industrial buildings roofs using form-finding techniques and computational intelligence algorithms” is in its third and final year, obtaining important advances in structural design.

In this work, a brief description of the genetic algorithm developed is presented, followed by its application for the optimization of the weight of a parallel cords flat lattice in an industrial warehouse of the city of Rafaela.

The results obtained are highly satisfactory, since the algorithm considerably reduces the weight of the truss and strengthens basic concepts on the design of flat structures.

The articulation between parametric design, finite element analysis and genetic algorithms creates a very powerful and flexible tool that makes it possible to obtain more efficient results than those obtained by engineers through their experience and intuition.

Keywords: Optimization; Structures; Genetic algorithms, Formfinding.

Matías Bonelli, Silvana A. Gudiño Gutiérrez

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela. Acuña 44, Rafaela, Argentina.

Tel./Fax: (03492) 432702.

Mail: matiaskb@outlook.com

INTRODUCCIÓN

El diseño estructural es el proceso que, partiendo de los datos propios del objeto a construir permite proyectar un sistema estructural completo, estable, permanente y factible. Generalmente no es reconocido como tal por la mayoría de los especialistas. Incluso es confundido con una de sus etapas: el análisis estructural. Pero el análisis es la etapa final del proceso de diseño y su comprobación (Reboredo, 1999).

El cálculo no es más que una herramienta para prever si las formas y dimensiones de una construcción, simplemente imaginada o ya realizada, son aptas para soportar las cargas a que habrá de estar sometida. El asombroso avance, que en las teorías mecánicas de los elementos sustentantes de las construcciones han producido los siglos XIX y XX, hace menospreciar excesivamente el estudio ontológico de la morfología resistente. “Todo proyectista que descuide el conocimiento de sus principios, está expuesto a graves fracasos; y el caso es que en las escuelas hay tanto que aprender que rara vez queda tiempo para pensar” (Torroja Miret, 2007).

El objetivo primario del ingeniero estructural es diseñar, no analizar (Norris et al, 1977). El profesional corriente, salvo raras excepciones, formado en una escuela que concede exclusiva importancia al análisis, debe encontrar dificultosamente un camino por el procedimiento más lento: prueba y error (Reboredo, 1999). Este proceso consiste en definir un diseño inicial cuyo comportamiento es analizado numéricamente. De los resultados de dicho análisis se pueden deducir, por experiencia o intuición, los cambios a realizar para mejorar dicho diseño. Se finaliza el proceso cuando se considera que el diseño es lo suficientemente bueno (Nicolás, 2006).

De este modo, dos proyectistas diferentes llegan a dos soluciones diferentes perfectamente factibles desde el punto de vista de la resistencia y estabilidad estructural, o del cumplimiento de normas. Sin embargo estas estruc-

turas seguramente tendrán costos y pesos diferentes (Sánchez Caballero, 2012), y muy difícilmente sean el diseño más adecuado desde el punto de vista económico o de ahorro de materiales, ya que se encuentran afectadas por una serie de decisiones subjetivas durante el proceso.

Una celosía plana posee parámetros que pueden variar para hacerla más eficiente, como ser: la distancia entre cordones, la cantidad de barras, la tipología, el tipo de perfiles empleados, etc. La modificación de cualquiera de estos parámetros genera una nueva estructura que se comporta de una manera distinta a las demás. La combinación de todas las variantes posibles genera un conjunto solución.

El diseñador no dispone de la capacidad suficiente para asegurar que la propuesta seleccionada sea la óptima, ya que le es físicamente imposible evaluar el espectro completo de posibles soluciones (Velázquez Villega y Santillán Gutiérrez, 2013).

En la actualidad, existen muchas herramientas para el análisis, pero pocas para el diseño (Ochsendorf, 2006). El objetivo del proyecto es dotar al diseñador de un instrumento que obtenga, dentro del espacio de búsqueda desarrollado, celosías planas de acero resistentes y que a su vez sean óptimas, o cercanas a estas, respecto a su peso propio.

En este trabajo se realiza una breve síntesis de la herramienta desarrollada, denominada algoritmo genético CeFeLix (AGC), aplicándosela a la optimización de una cercha real de una nave industrial de la localidad de Rafaela.

METODOLOGÍA

Algoritmo genético CeFeLix

El AGC es una combinación de diseño paramétrico (DP), análisis por método de elementos finitos (MEF) y algoritmos genéticos (AG).

El DP es un proceso que consiste en la especificación

de puntos, líneas, curvas o superficies por medio de una o más variables que adoptan valores dentro de intervalos definidos por el usuario (Togores, 2016). Cada entidad posee parámetros asociados que controlan las diversas propiedades geométricas, tales como su longitud, anchura, altura, radio, etc. También controlan la ubicación de estas entidades en el modelo y cómo las mismas se relacionan entre sí. Los parámetros pueden ser modificados por el operador para crear la geometría deseada.

El diseño paramétrico es fundamental para reducir el esfuerzo necesario en modificar y crear variantes en el diseño. Generar un proceso automatizado elimina tediosas tareas repetitivas, la necesidad de complicados cálculos manuales, la posibilidad del error humano, y provoca grandes alteraciones en el resultado sólo con ligeras variaciones en los parámetros iniciales (Morales Pacheco, 2012).

Dentro del algoritmo genético desarrollado, el cálculo de tensiones y deformaciones de las barras se realiza por medio del MEF. La idea general del método es la discretización de la estructura, es decir, la división del continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. La formulación permite que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de requerir la resolución de ecuaciones diferenciales complejas (Jiménez Pérez Mitre, 2004).

En el caso particular de las cerchas metálicas, las estructuras son sistemas discretos por naturaleza. Los elementos son las barras (elementos unidimensionales o lineales), mientras que los nodos de conexión de dichos elementos son las articulaciones que unen a las barras. Gracias a ello, los resultados que arroja el MEF son exactos (Zienkiewicz y Taylor, 1994). De esta manera, el MEF se convierte en una herramienta sumamente adecuada con una disminución notable de cálculos necesarios.

Un AG es un método de búsqueda global estocástica que imita la evolución biológica natural (Togan et al., 2015). Está conformado por un conjunto de operaciones altamente paralelas que hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados (Garduño Juárez, 2012). Resumiendo, el AG toma el conjunto solución de un problema planteado y, a través de operadores genéticos, encuentra el individuo de mayor aptitud, es decir, la solución óptima. En forma general actúa como se muestra en la figura 1.

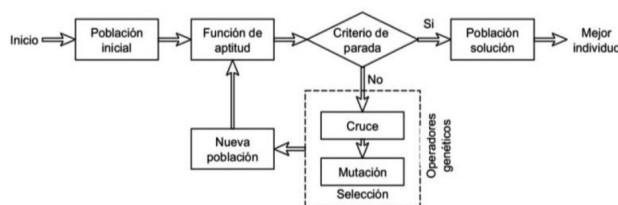


Fig. 1: Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple.

Para desarrollar el AGC se recurrió al software de programación visual Grasshopper 3D que utiliza para su interfaz gráfica el entorno Rhinoceros. A su vez se adaptaron dos plug-in: uno para realizar el cálculo a través del método de los elementos finitos, llamado Karamba 3D, y otro para la optimización a través de AG denominado Galápagos.

Los pasos del AGC son los siguientes:

Inicialmente, por medio de DP se crea una geometría genérica que permite modificaciones a través de las distintas variables: altura de los cantos, cantidad de barras por cordón, pendiente de los faldones, etc. Al darle valores

a estos parámetros se obtiene un modelo determinado.

Posteriormente se ensambla dicha geometría con las condiciones de contorno de apoyos y de veintisiete estados de cargas establecidos por el Reglamento CIRSOC 301-2005 que contempla carga permanente, sobrecarga, viento y carga puntual colgada. Además incluye los parámetros de material, secciones utilizables y deflexión máxima.

En un tercer paso, este modelo se somete al análisis estructural por medio del MEF y se optimizan las secciones: el software recorre la lista de perfiles ordenados por peso de menor a mayor y asigna a cada barra el primero que satisface las solicitaciones impuestas de acuerdo a los Reglamentos CIRSOC 302-2005 y CIRSOC 303-2005. Este proceso modifica el peso propio de la estructura, generando un nuevo estado de cargas, por lo que el procedimiento se itera cinco veces para lograr un cálculo más preciso. Con la asignación de los perfiles se obtiene una cercha plana que cumple con las restricciones atribuidas, es decir, una solución particular de todas las posibles (conjunto solución). La masa de dicho individuo es la que determina su aptitud: a mayor masa, menor aptitud y viceversa.

Todo el proceso se repite al modificar los parámetros iniciales formando un conjunto de individuos o población denominada "primera generación". Dicha población, que no es más que un conjunto de soluciones al problema, posee individuos de mayor aptitud (menor peso) que otros. Los más aptos son los que se reproducen y mutan creando una segunda generación y así sucesivamente hasta obtener un individuo que se mantiene estable indefinidamente. Dicho individuo será el óptimo, es decir, el de menor masa propia. Al obtener este individuo óptimo pueden conocerse los valores de las variables que lo definen, que son sus parámetros de diseño.

El AGC se enmarca en los Reglamentos Cirsoc

101-2005, 102-2005, 201-2005, 301-2005, 302-2005 y 303-2009, y los perfiles que permite utilizar son los estipulados por las Normas IRAM – IAS U 500 – 2592, U 500-218 y U 500-205/3.

Optimización de estructura existente

La cercha seleccionada, denominada V1, corresponde a una nave industrial cuyas dimensiones son 12,00 m de frente por 24,00 m de largo (Figura 2).

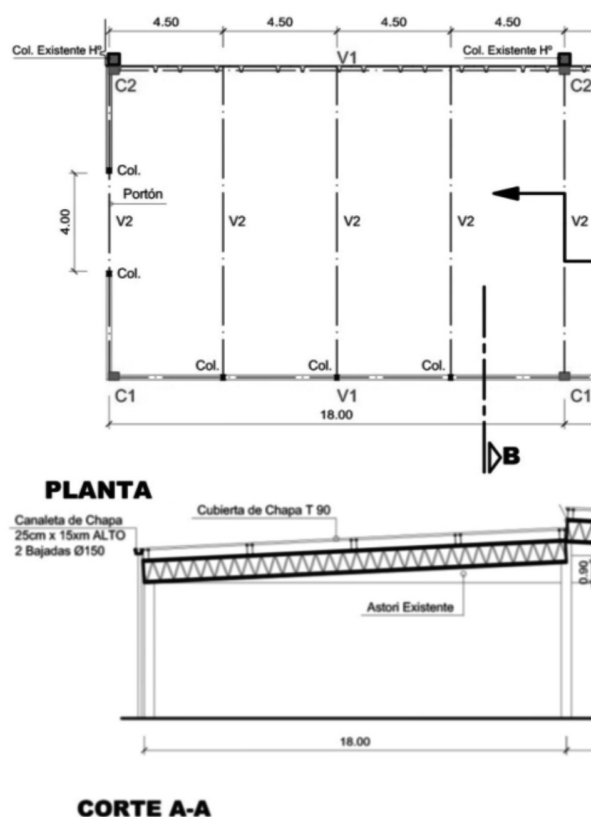


Fig. 2: Nave industrial existente.

Las características de la cercha V1 se describen a continuación y su detalle se encuentra en la figura 3.

Tipología: Warren.

Cantidad de faldones: 1.

Longitud de la celosía: 18,00 m.

Altura canto izquierdo (h): 0,90 m.
Diferencia de altura izquierda – derecha (Δa): 0,90 m.
Condiciones de vínculo (según cálculo original): isostática (apoyo doble – apoyo simple en los extremos de la cercha).
Tipo de cubierta: chapa autoportante T90 N°25.
Tipo de perfiles: conformados en frío tipo C.
Cordón inferior y superior: PCG 280x80x25x3,2 mm.
Diagonales: PCG 120x50x15x2 mm.
Paso de las diagonales: 0,60 m.
Peso de la cercha: 603,02 Kg (solo perfiles, no incluye medios de unión).

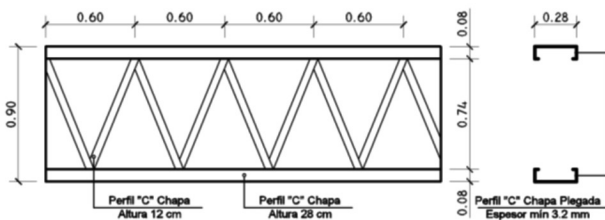


Fig. 3: Detalle cercha original.

Se definen las variables de diseño geométrico y los dominios de las mismas de acuerdo a los parámetros dados por el proyectista para el caso. Dichos valores pueden observarse en la Tabla 1. Un punto relevante es la ubicación de las cargas que, a diferencia de otros ejemplos, tienen una línea de acción establecida e inamovible. La altura de canto de toda la viga debe mantenerse constante ya que es requerimiento del proyecto que los cordones sean paralelos.

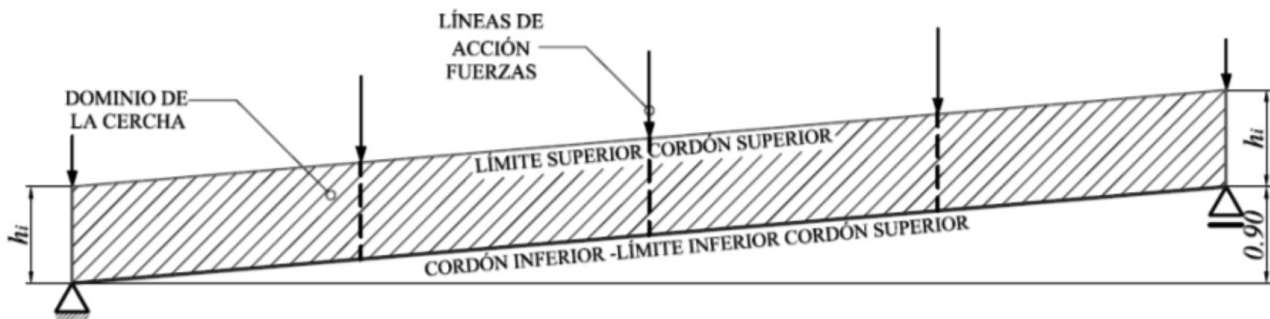


Fig. 4: Dominio geométrico.

Variable de diseño	Mín.	Máx.	Observaciones
Altura canto (h)	0.00m	1.50m	
Cant. de segmentos por cordón	4	48	Múltiplos de 4 para que V2 apoye sobre un nudo.
Tipología	Warren – Pratt – Howe		Se elige la más conveniente
Perfiles	C laminados en frío (PCG) Circulares huecos (SCH)		Según Normas IRAM – IAS U 500 - 2592 Según Normas IRAM – IAS U 500-205/3

Tabla 1: Parámetros optimizables de la celosía.

Estas condiciones generan el dominio de la geometría, es decir, las posibles ubicaciones que pueden tomar los cordones y, por ende, el lugar en que se desarrollarán montantes y diagonales. Dicho dominio se representa en la figura 4.

Se ejecuta con tres tipologías distintas ya que cada una de ellas tiene ventajas respecto a las otras bajo condiciones de carga particulares.

La celosía tipo Pratt puede ser de cordones paralelos o no, posee montantes y diagonales que se disponen en forma de “V”, como lo demuestra la figura 5. Suele emplearse para luces moderadas. Su ventaja principal radica en que las diagonales, que son las barras más largas de la estructura de relleno, están solicitadas a tracción cuando las cargas preponderantes son gravitatorias (Arcelor Mittal, 2016).

La celosía tipo Howe también es una celosía plana que puede ser o no de cordones paralelos, con montantes

y diagonales, pero a diferencia de las vigas Pratt, las diagonales se invierten formando “V” invertidas (Δ), como se observa en la figura 6. También se emplea para luces moderadas. Tiene como inconveniente la ventaja dada al tipo Pratt; es decir, las diagonales trabajan en compresión mientras que los montantes lo hacen a tracción bajo cargas gravitatorias. Pero esto es una ventaja en otro caso de carga. En la celosía de la imagen 6 las diagonales están sometidas a tracción bajo cargas de levantamiento. Se utilizan cuando predominan las cargas de succión, por ejemplo, viento en edificios abiertos (Arcelor Mittal, 2016).

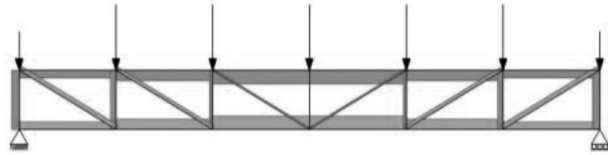


Fig. 5: Viga Pratt bajo cargas gravitatorias.

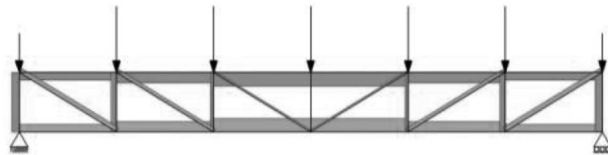


Fig. 6: Viga Howe bajo cargas de succión.

La celosía tipo Warren, tiene una característica importante: no posee montantes sino que su estructura de relleno está compuesta únicamente por diagonales de igual longitud como se ve en la figura 3. Las diagonales se intercalan entre comprimidas y traccionadas, siendo ambas de igual longitud. Generalmente son muy aptas si las cargas son variables sobre la parte superior de la celosía, como por ejemplo en una pasarela, ya que presenta resistencia similar para diversas configuraciones de carga (Castro, 2014).

Debido a estas características tan disímiles y desconociendo si los estados de carga serán predominante-

mente gravitatorios o de succión, se ejecutó el algoritmo con las tres tipologías.

El paso de todas las variables geométricas es de 0,01 m, mientras que la cantidad de segmentos de cada cordón se determina por un número múltiplo de cuatro (4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48) para coincidir con el punto de aplicación de las cargas.

Calculando las combinaciones, se comprueba que el espacio de búsqueda posee 1.800 soluciones al problema. Se ejecuta el AGC para las distintas tipologías y perfiles obteniendo resultados distintos para todos los casos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 2. Comparando cerchas con el mismo tipo de perfiles (PCG), la de menor peso es la tipología Howe, por lo que se detalla su conformación en la figura 7.

Variable	Howe con PCG	Pratt con PCG	Warren con PCG	Howe con SCH	Pratt con SCH
Segmentos	12	12	14	12	12
Altura canto (h_i)	1,50 m	1,49 m	1,50 m	1,46 m	1,50 m
Peso	330,98 Kg	335,86 Kg	346,59 Kg	299,13 Kg	313,20 Kg

Tabla 2: Resultados obtenidos de las cinco variantes.

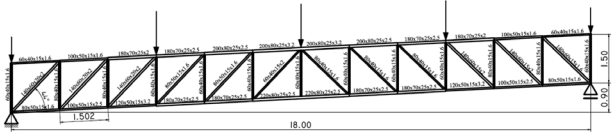


Fig. 7: Estructura Howe optimizada por AGC.

DISCUSIÓN

De las cinco celosías obtenidas, las dos últimas indicadas en la Tabla 2 se ejecutaron únicamente para demostrar la eficiencia de los tubos circulares. La

sección circular hueca (SCH) proporciona niveles superiores de resistencia al pandeo cuando se somete a compresión en comparación con otras secciones. Esto es porque su forma es la única completamente simétrica en cualquier dirección que pasa por su centro de gravedad. En pocas palabras, la circunferencia es la única forma que tiene todos sus puntos equidistantes de su centro. Debido a esta simetría radial, ante la aplicación de una fuerza de compresión en el centro geométrico, perpendicular a la sección transversal circular, todas las tensiones se encuentran a la misma distancia, evitando de este modo las asimetrías o direcciones de pandeo más débiles (Araujo et al., 2014).

Respecto a la celosía Warren escogida para la estructura existente, puede determinarse que existe un error en cuanto a su diseño, a su concepción. Cualquiera sea el paso de las diagonales, siempre un punto o dos de aplicación de las cargas transmitidas por las correas V2 queda fuera de un nudo, generando una flexión sumamente importante en una barra y las aladañas, como denota la figura 8. En efecto, los momentos reales en los demás nudos debido al peso propio, son del orden de 0,1 a 0,2 kNm, mientras que en la barra en cuestión se genera un momento flector máximo de $-6,75$ kNm, es decir, cuarenta y cinco veces mayor de lo normal.

En caso de distribuir esta carga entre los dos nudos contiguos, los perfiles centrales del cordón superior pasan de PCG 300x80x25x3.2 a PCG 220x80x25x3.2, por lo que el peso final de la cercha disminuye 10,87 Kg y pasa a ser de 335,72 Kg, intermedio entre las celosías Howe y Pratt optimizadas. Esto demuestra que la viga tipo Warren es una solución intermedia entre las otras dos, ya que la Howe es adecuada para cargas de levantamiento mientras que la Pratt es más eficiente ante estados de carga gravitatorios.

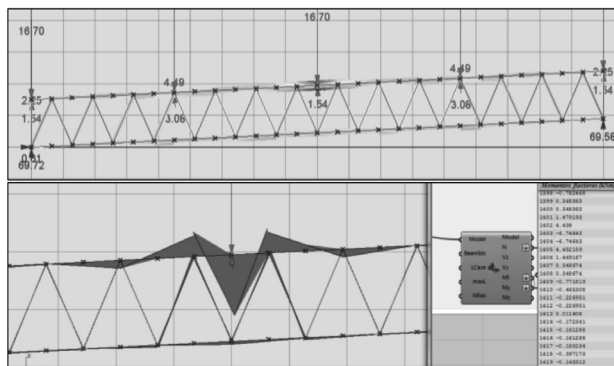


Fig. 8: Solicitación en barra debido a punto de aplicación de la carga.

Algunos autores han propuesto un ángulo de diagonales óptimo cercano a los 60° (Abid & Naseem, 2006). La optimización del AGC se aproxima a este valor, dando como resultado $66,5^\circ$, que es el ángulo más cercano a los 60° que puede tomar constructivamente.

Todas las demás celosías poseen características similares, por lo que pueden realizarse algunas suposiciones del conjunto:

Optimización de secciones: uno de los parámetros de salida del software es la utilización de la sección transversal, que es la relación porcentual de la tensión de trabajo respecto al límite elástico. En este caso, la utilización oscila entre el 98.6% y el 99.5%. Esto demuestra la eficiencia de la elección de los perfiles para cada tramo.

La celosía tipo Howe reduce el peso de la cercha un 45,1%. En gran parte esto se debe a la utilización de una gran variedad de perfiles que, como se observa en la figura 7, hace que su materialización sea muy difícil. Si realizamos un procedimiento de simplificación constructiva, dejando una clase de perfiles para cada cordón y una para los montantes y diagonales, el peso de las celosías sería de 516,86 Kg, aún 14,3% más liviana y ello se debe a la optimización de forma.

Optimización de forma: los cordones se separan el máximo posible para obtener un mayor brazo de palanca y, por lo tanto, un mayor momento resistente del conjunto.

La cercha más liviana es la de tipología Howe, por lo que puede deducirse que las cargas de levantamiento son ligeramente predominantes respecto a las cargas gravitatorias. La diferencia de peso con la de tipología Pratt es mínima (1,2%).

Esto se debe a que los módulos de los estados de carga gravitatorios (carga permanente + sobrecarga) son muy similares a los estados de carga de succión (viento) generando envolventes en las barras con componentes de tracción y compresión muy parecidas. Esto sumado a la simetría horizontal de la estructura respecto a su baricentro hace que ambas tipologías arrojen resultados semejantes. Un dato que sirve a este ejemplo es la paridad de peso entre los cordones. La cercha tipo Howe de PCG posee un cordón superior que pesa 105,32 Kg, mientras que el cordón inferior pesa 105,15 Kg.

Optimización topológica: el número de cavidades se mantiene constante para ambas tipologías y para ambos casos de perfiles. Se puede concluir que la cantidad de barras es independiente de estos parámetros. Según Abid y Nasseem (2006), el parámetro más importante en la optimización de vigas de cordones paralelos es el ángulo de las diagonales que, según su investigación, para cerchas tipo Pratt y tipo Howe tiende a 45%. El ángulo óptimo conseguido por el AGC es de 44°, los que sustenta la teoría de estos autores.

Por último, como sucede en todos los casos analizados, la cantidad de barras requeridas al optimizar la estructura se reduce significativamente. La cercha original posee 123 barras, la Warren optimizada 59 y la Howe optimizada 49. Esto representa un menor número de uniones y mano de obra de elaboración. Además, las celosías Howe y Pratt tienen un comportamiento adecuado, puesto que todas las cargas se

transfieren directamente a los nudos, generando que los mayores esfuerzos sean los axiles.

CONCLUSIONES

La técnica de optimización por medio de AGs logró un comportamiento eficiente, obteniendo una armadura cuyo peso disminuyó significativamente respecto a la conseguida por métodos tradicionales, además de cumplir con las restricciones impuestas y encuadrarse en los reglamentos vigentes.

Las soluciones que se obtienen se adaptan perfectamente a los criterios intuitivos de la ingeniería. Al optimizar la geometría de la estructura original se obtienen nuevas estructuras que trabajan mejor y que disminuyen la cantidad de material para resistir el mismo esfuerzo.

Cada cercha a diseñar posee distintas variables y condiciones que la hacen única, por lo que la intuición ingenieril y la experiencia juegan un papel preponderante pero no excepcional. La articulación entre DP, análisis por MEF y AG concibe una herramienta muy potente y flexible que hace posible obtener mejores resultados que los que podría obtener cualquier ingeniero.

La bondad de los resultados es directamente proporcional a la cantidad de variables de la cercha que pueden optimizarse. Mientras más limitaciones existan a los distintos parámetros de diseño, menor será la eficiencia respecto a métodos tradicionales.

No obstante es necesario considerar que los costos no dependen únicamente del peso de la estructura. Por ello es necesario tener en cuenta en futuros trabajos funciones objetivo que incluyan otros factores como mano de obra, desperdicios y simplicidad constructiva.

REFERENCIAS

- Abid, M., Naseem, M. (2006). *Optimization of different truss geometries using finite element analysis*. In 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids. Jeju, Korea.
- Araujo, A.L., Barbosa Neto, W., Celani, G. (2014). *Treliçase spaciais metálicas: incorporação de requisitos de dimensionamento aosestágios iniciais do design paramétrico*. Campinas: University of Campinas. SIGRADI 2014 (pp.355-359). Campinas: University of Campinas.
- ArcelorMittal, Peiner Träger y Corus. (2016). *Steel Building in Europe*. Web: <http://sections.arcelormittal.com/es/documentacion/manuales-de-diseno-steel-buildings-in-europe.html>
- Castro, M.E. (2014). *Reticulados Planos: La necesidad de alivianar*. Web: <http://repositorio.ub.edu.ar:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3696/4029%20-%20dise%C3%B1o%20estructural%20-%20castro.pdf?sequence=1>.
- Garduño Juárez, R., 2012. http://acmor.org.mx/descargas/12_sep_03_algoritmos.pdf
- Grasshopper 3D (Version August-27, 2014. Build 0.9.0076.). Web: <http://www.grasshopper3d.com/>
- Galápagos. Web: <http://www.grasshopper3d.com/group/galapagos>
- INTI - CIRSOC 101, 2005. *Reglamento argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras*. Buenos Aires: Ed. INTI.
- INTI - CIRSOC 102, 2005. *Reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones*. Buenos Aires: Ed. INTI.
- INTI - CIRSOC 201, 2005. *Combinación y Mayoración de Acciones – Ejemplos de Aplicación del Reglamento CIRSOC 201-2005*. Buenos Aires: Ed. INTI.
- INTI - CIRSOC 301, 2005. *Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios*. Buenos Aires: Ed. INTI.
- INTI - CIRSOC 302, 2005. *Reglamento argentino de elementos estructurales de tubos de acero para edificios*. Buenos Aires: Ed. INTI.
- INTI - CIRSOC 303, 2009. *Reglamento argentino de elementos estructurales de acero de sección abierta conformados en frío*. Buenos Aires: Ed. INTI.
- IRAM - IAS, 2002. *Norma U 500 - 2592: Tubos de acero al carbono con costura para uso estructural. Tabla de aplicación*. Buenos Aires: IRAM - IAS.
- IRAM - IAS, 2002. *Norma U 500-218. Tubos de acero sin costura para uso estructural y aplicaciones mecánicas en general. Tabla de aplicación*. Buenos Aires.
- IRAM - IAS, 2005. *Norma U 500-205/3. Perfiles abiertos de chapa de acero galvanizada, conformados en frío para uso en estructura portante de edificios. Parte 3: Perfil C. Medidas y características geométricas. Tabla de aplicación*. Buenos Aires: IRAM - IAS.
- Jiménez Pérez Mitre, A. (2004). *Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos*. Cholula: Universidad de las Américas Puebla.
- Karamba 3D (License type: student FOR NON-COMMERCIAL USE ONLY. Date of expiration: never to come / Licensee: Name: Matias Bonelli). Web: <http://www.karamba3d.com/>

karamba3d.com/

Morales Pacheco, L.A. (2012). *Arquitectura paramétrica aplicada en envolventes complejas en base a modelos de experimentación*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, Vol. IV, núm. 3, pp.1-11.

Nicolás, M.V. (2006). *Optimización de forma y topología con malla fija y algoritmos genéticos*. Tesis doctoral. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

Norris, C.H., Wilbur, J.B., Utku, S. (1977). *Elementary structural analysis*. New York: Editorial McGraw-Hill.

Ochsendorf, J. (2006). http://www.ibpsa.us/sites/default/files/publications/SBo6_An-6.pdf

Reboredo, A. (1999). *El proceso de diseño estructural*. Separata de "Manual de Construcción Sismorresistente".

Mendoza: Centro de Ingenieros, Arquitectos y Agrimensores de Mendoza y Sociedad de Arquitectos de Mendoza.

Rhinoceros (Version 5 SR5, 5.5.30912.16275, 12/09/2013) Educational. Web: <http://www.rhino3d.com>

Sánchez Caballero, S. (2012). *Optimización estructural y*

topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Togores Fernández, R. (2016). Web: <http://www.togores.net/home/disenoparametrico>

Velázquez Villega, F., Santillán Gutiérrez, S.D. (2013). *Optimización de forma de un cuerpo suspendido basada en reglas evolutivas y modelado paramétrico: la forma de un fruto*. Revista: Ingeniería, Investigación y Tecnología, vol. VII, núm. 3, julio-septiembre, 2006, pp. 139-150.

Togan, V., Durmaz, M., Daloglu, A. (2015). *Optimization of roof trusses under the snow loads given in turkish code and the gis-based snow load map*. Trebisonda: Karadeniz Technical University.

Torroja Miret, E. (2007). *Razón y ser de tipos estructurales*. Madrid: Editorial Doce Calles.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (1994). *El método de los elementos finitos - Volumen I*. Barcelona: Editorial McGraw - Hill / CIMNE.